

5. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЛУЗІ

УДК 66.047

*Проф. Я.М. Ханік, д-р техн. наук; аспір. Н.З. Білецька;
асист. В.М. Кузьма; ст. викл. О.В. Омельчук – НУ "Львівська політехніка"*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНДУКТИВНО- ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

Наведено математичні залежності внутрікапілярного процесу сушіння, а також розрахункові та теоретичні результати визначення тривалості фільтраційного сушіння. На підставі викладеного матеріалу можна передбачити контури сушильного агрегата, який реалізує принцип фільтраційного сушіння виробів. Він представляє собою багатопозиційний обертальний круглий стіл з періодом обертання, що дорівнює тривалості сушіння з автоматичною подачею сушильного агента та автоматизованими вкладенням та зняттям виробу.

Ключові слова: фільтрація, сушіння, період.

*Prof. Ya.M. Khanyk; post-graduate N.Z. Biletska; assist. V.M. Kuzma;
senior lecturer O.V. Omelchuk – NU "L'vivs'ka Politekhnik"*

The mathematic model of drying filtration proses

Present are experimental dependences of kinetics dryings of the sheet gas-permeability materials by a convection-filtration method. On the basis of the expounded material it is possible to foresee the contours of drying aggregate which will realize principle of the lauter drying of wares. He is multiposition rotatory round table with the period of rotation which equals duration of drying with an automatic serve drying an agent and automated an investment and removal of good.

Keywords: convection, drying, period.

Постановка проблеми. Зневоднення крупних об'єктів методом конвективного сушіння, тобто шляхом обтікання об'єкта потоком гарячого сушильного агента, потребує багато часу та відповідно більших витрат сушильного агента високої температури. За даними А.В. Ликова [1], тривалість процесу сушіння в період постійної швидкості пропорційний розміру об'єкта, а в період спадання швидкості – квадрату цього розміру.

Саме тому конвективне сушіння набуло широкого застосування для зневоднення дисперсних матеріалів. Для одного класу крупних вологих об'єктів існує змога значно, в 20-50 разів, прискорити процес сушіння. Йдеться про сушіння газопроникних виробів методом вимушеної фільтрації через нього гарячого сушильного агента. Постадійне вивчення процесу легко пояснює причину такого значного прискорення.

Аналіз останніх досліджень. На відміну від фільтраційного сушіння, кондуктивний процес масообміну супроводжується фазовим перетворенням і зовсім відсутнє механічне витіснення та винесення вологи. Під час фільтраційного тепломасообміну відбувається значне механічне витіснення вологи, яке не потребує затрат теплової енергії [2].

Постановка завдання. Особливе місце у вивченні фільтраційного тепломасообміну займає узагальнення результатів досліджень. Виходячи із

фізики фільтраційного зневоднення, весь процес можна умовно розділити на декілька стадій.

1. Стадія механічного витіснення вологи із пористої структури об'єкта. Ця стадія перебігає дуже швидко протягом декількох секунд і супроводжується видаленням до 70 % вологи, яка заповнює пористий об'єм виробу. Тривалість витіснення легко визначити на основі закону фільтрації Дарсі, тобто за такою формулою:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{K}{\varepsilon \mu} \frac{\Delta p}{H};$$

де: H – товщина матеріалу, м; K – коефіцієнт пропорційності; t – тривалість процесу сушіння, с; ε – пористість, м³/м³; μ – в'язкість газу, Па·с; Δp – перепад тисків, Па. Внаслідок інтегрування цього виразу визначимо тривалість t_n повного витіснення, а саме

$$t_n = \frac{\varepsilon \mu H^2}{2K \Delta p};$$

2. Тривалість процесу фільтраційного сушіння капілярно-пористих матеріалів визначимо декількома хвилинами. Причина такого швидкого перебігу процесу полягає в тому, що інтенсивне сушіння переноситься на рівень тих дисперсних елементів, з яких складається пористий об'єкт. На декілька порядків зростає поверхня випаровування. Масштабні структурні елементи, що містять вологу, обтікаються потоком сушильного агента подібно до того, як у разі звичайного конвективного сушіння обтікаються весь крупний об'єкт. Досвід показує, що найбільша зміна вологості в процесі фільтраційного сушіння виникає в період постійної швидкості сушіння. Основуючись на закономірностях цього періоду, було отримано систему рівнянь, які визначають кінетику фільтраційного сушіння [2, 3]

$$\begin{cases} -\frac{\partial W}{\partial t} = m(1-\varphi); \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x} = n(1-\varphi), \end{cases} \quad (1)$$

де: W – поточна вологість, %; m – коефіцієнт пропорційності; φ – відносна вологість повітря, %; ∂x – елементарна товщина шару, в якій відбувається тепломасообмін, м; n – коефіцієнт пропорційності. Розв'язок цієї системи за граничних умов $W|_{t=0} = W_0$; $\varphi|_{x=0} = \varphi_0$ має такий вигляд:

$$\begin{cases} W = W_0(1 - a t e^{-n x}); \\ \varphi = 1 - (1 - \varphi_0) e^{-n x}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{де } a = \frac{m(1-\varphi_0)}{W_0};$$

Таким чином, нестационарне поле вологості визначено двома константами $a \left[\frac{1}{c} \right]$ і $n \left[\frac{1}{m} \right]$.

Усереднене за товщиною об'єкта H значення вологості:

$$\bar{W} = \frac{1}{H} \int_0^H W dx = W_0 \left(1 - at \frac{1 - e^{-nH}}{nH} \right); \quad (3)$$

де: W_0 – початкова вологість, %; φ_0 – вологість на поверхні матеріалу, %; $\bar{W}$ – інтегральна (загальна) вологість, %.

Надалі розглянемо такий процес сушіння, який за будь-якого значення x описується системою (1) у всьому діапазоні зміни вологості від W_0 до 0. Допускаючи це, ми нехтуємо періодом спадання швидкості сушіння. Для цього є вагомі фізичні основи. Справа не тільки в тому, що процес сушіння зазвичай припиняється до досягнення критичної вологості, після якої швидкість сушіння у першому періоді починає знижуватися. В умовах фільтраційного сушіння дисперсні елементи, з яких складається виріб і які обтікаються потоком сушильного агента, достатньо малі, внаслідок чого і мала критична вологість [1].

За таких припущень зрозуміло, що рівняння (2) і (3) справедливі, якщо $t > 1/a$ виникає нова ситуація – утворюється позбавлена вологості область довжиною l , яка розширюється з часом. У таких умовах система (1) має такий розв'язок:

$$\begin{cases} W = W_0 [1 - e^{-n(x-l)}]; \\ \varphi = 1 - (1 - \varphi_0) e^{-n(x-l)}. \end{cases} \quad (4)$$

Підстановка в (1) визначає величину l як функцію часу

$$l = \frac{1}{n} (at - 1). \quad (5)$$

Середня за товщиною виробу вологість

$$\bar{W} = \frac{1}{H} \left[\int_0^l 0 dx + \int_l^H W dx \right] = W_0 \left[\left(1 - \frac{l}{H} \right) - \frac{1 - e^{-n(H-l)}}{nH} \right].$$

За допомогою залежності (5) одержимо остаточно такий вираз:

$$\bar{W} = W_0 \left[\left(1 - \frac{l}{nH} \right) - \left(at - e^{-nH+at-1} \right) \right]. \quad (6)$$

Проаналізуємо тепловий аспект процесу сушіння. Підведене до об'єкта гаряче повітря на виході із нього зменшує свою температуру. У процесі фільтрування крізь пористий об'єкт тепло віддається на випаровування води і на прогрівання самого матеріалу, внаслідок чого температура сушильного агента істотно знижується, хоч з часом вона зростає.

Для першого періоду $t < 1/a$ тепло витрачається тільки на випаровування.

Рівняння балансу має такий вигляд:

$$\rho g F C (T_0 - T) = - \frac{Mr}{100} \frac{d\bar{W}}{dt}. \quad (7)$$

Для цього періоду температура самого матеріалу майже не підвищується.

Для періоду сушіння $t > 1/a$ появляється поступове зростання температури теплоносія, область пористого об'єкта, позбавлена води, яка, внаслідок цього, швидко прогривається до температури сушильного агента

$$\rho \vartheta FC (T_0 - T) = -\frac{Mr}{100} \frac{d\bar{W}}{dt} + \frac{d}{dt} \left[C_M (T_0 - T_H) M \frac{l}{H} \right]. \quad (8)$$

Підставляючи (3) в (7) і (6) у (8) отримаємо рівняння, що дають змогу визначити температуру повітря, яке виходить із матеріалу:

- при $t < 1/a$

$$T = T_0 - \frac{r \rho_M W_0 a}{100 \rho \vartheta C n} (1 - e^{-nH}); \quad (9),$$

- при $t > 1/a$

$$T = T_0 - \frac{r \rho_M W_0 a}{100 \rho \vartheta C n} (1 - e^{-nH + at - 1}) - \frac{C_M (T_0 - T_H) \rho_M a}{\rho \vartheta C n}, \quad (10)$$

де: r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг; M – маса випареної води, кг; C – теплоємність, кДж/°С; T_0 , T – відповідно температури теплоносія на вході і виході із шару, °С, F – геометрична поверхня матеріалу, м²; ρ – густина повітря, кг/м³; ϑ – швидкість руху повітря, м/с; ρ_M – густина матеріалу, кг/м³.

Енергетичну ефективність фільтраційного сушіння визначають коефіцієнтом корисної дії

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_k + Q_2},$$

в якому корисна витрата тепла Q_1 витрачається на випаровування води

$$Q_1 = \frac{MW_0}{100} r.$$

А загальні витрати енергії, пов'язані з роботою компресора, становлять

$$Q_1 = P_1 \vartheta F \ln \frac{P_2}{P_1} t_k \frac{1}{\eta_k}$$

та підігрівом повітря

$$Q_2 = \rho \vartheta FC (T_0 - T_H) t_k.$$

Об'єктом сушіння є листовий матеріал, початкова вологість якого $W'_0 = 250\%$ швидко спадала до $W_0 = 60\%$ внаслідок механічного видалення води. Подальше зниження вологості відбулося за рахунок випаровування. Швидкість руху сушильного агента (повітря), розрахована на всю поверхню об'єкта, збільшувалась з ходом процесу сушіння, що пояснювалось зниженням гідравлічного опору внаслідок збільшення вільного об'єму по мірі видалення води. Однак, це збільшення швидкості було невеликим $v = 1.1 - 1.3$ м/с.

В процесі експерименту листовий матеріал досліджували цілком ($H = 0,036$ м) або розрізали на 4 частини, кожна товщиною 0,009 м, після чого в комплекті поміщали в сушильну камеру. Це робили для того, щоб у певний момент часу визначити розподіл вологості по шарах висушуваного об'єкта, ідентифікувати цей розподіл з рівнянням (2). У кожний момент часу процес сушіння переривали, об'єкт виймали з сушильної камери і визначалась його

вологість. В процесі експерименту вимірювалась температура сушильного агенту до і після проходження через об'єкт. Збереження теплового балансу було утруднене внаслідок втрат тепла на нагрівання сушильної камери та на теплопередачу в навколишнє середовище. Однак, більшу частину тепла витрачали на випаровування вологи.

Експерименти, виконані за $t = 120$ с і $t = 210$ с, тобто за такого часу, коли весь об'єм об'єкта заповнений рідиною, а область, позбавлена вологи, ще не утворилась. Із формули (2) випливає

$$\lg \frac{1}{t} \left(1 - \frac{W}{W_0} \right) = \lg a - 0,434nx.$$

Звідки випливає таке: $n = 44,77$ 1/м; $a = 0,00479$ 1/с. Для розрахунків використано рівняння (3), якщо $t < 1/a = 209$ с і рівняння (6) якщо $t > 209$ с. Повна тривалість процесу сушіння, що випливає з (5):

$$t_k = \frac{1}{a}(1 + nH) = \frac{1 + 44,77 \cdot 0,036}{0,00479} = 545\text{с}.$$

За рівняннями (9) і (10) розраховано значення температури вихідного повітря і зіставлено з дослідними даними. За рівняннями (11) розраховано коефіцієнт корисної дії. Він становить 21 %. Таке значення коефіцієнта за вихідної вологості об'єкта 60 %. Фіктивний коефіцієнт розраховано за тим самим співвідношенням (11) за дійсної початкової вологості 250 % і становить 88 %. У розрахунку η вважають випареною всю воду, зокрема і ту, яку механічно витіснено.

Висновок. Викладений матеріал дає змогу передбачити контури сушильного агрегата, що реалізує принцип фільтраційного сушіння виробів. Це багатопозиційний обертальний круглий стіл з періодом обертання, що дорівнює тривалості сушіння з автоматичною подачею сушильного агенту та автоматизованими вкладенням та зняттям виробу.

Література

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
2. Аксельруд Г.А., Чернявский А.И., Ханьк Я.Н. Сушка материалов способом фильтрации теплового агента // И.Ф.Ж. – 1978. – Т. XXXIV, № 2. – С. 230-235.
3. Аксельруд Г.А., Ханьк Я.Н. Фильтрационная сушка плоских газопроницаемых объектов // Теоретические основы химической технологии. – 1990. – Т. 24, № 3. – С. 402-405.

УДК 004.932; 681.142.2; 622.02.658.284; 621.325

Доц. Д.Д. Пелешко,

канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

ТОПОЛОГІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ТА НАБОРІВ ЗОБРАЖЕНЬ

Наведено чіткий математичний опис представлення топології покриття зображення та наборів зображень, який базується на формуванні покриттів в евклідовому координатному просторі з подальшим ін'єктивним відображенням цих топологій у простір кольору.

Ключові слова: зображення, евклідовий простір, топологія, покриття зображення, фрейм, фрагмент, потік, збіжність, оператор, піксел, колір.